保罗·凯茨

应用微处理机的数字控制

化学工业出版社

应用微处理机的数字控制

保罗·凯茨 著
宋建成 译
周春晖 审校

化学工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了应用微处理机的数字控制，全书共九章。第一章介绍必要的数学工具和系统理论的基础知识；第二、三、四章介绍单回路和多变量系统的数字控制设计方法。第五章讲述控制算法在微型机上的实现；第六章介绍了数字算法误差分析；第七章介绍数字控制设计中最重要的问题之一——采样频率的选择。最后两章是两个设计示例，通过两个例子把前面的设计思想阐明得更透彻。本书每一章后都有相当数量的习题。

本书特别适合于熟悉模拟控制设计的技术人员学习和了解数字控制。

PAUL KATZ

Digital Control using Microprocessors

Prentice/Hall International, London, 1981

应用微处理机的数字控制

宋建成　译

周春晖　审校

责任编辑：陈逢阳

封面设计：季玉芳

*

化学工业出版社出版发行

（北京和平里七区十六号楼）

化学工业出版社印刷厂印刷

化工出版社印刷厂装订

新华书店北京发行所经销

*

开本 787×1092 1/32　印张 11　字数 250 千字

1990 年 10 月第 1 版　1990 年 10 月北京第 1 次印刷

印数 1—2,320

ISBN 7-5025-0737-X/TP·20

定　价 7.50 元

前　　言

采用微处理机的控制器设计是一门日新月异、迅速成长的学科。根据我个人的经验，刚走出校门的年轻工程师很快就征服了这门学科，与此相反，具有丰富的模拟控制器设计经验的老一代控制工程师却普遍都有从模拟网路设计改变为微处理机编程并非容易之感。

尽管如此，在模拟控制器设计工作中积累起来的经验仍然是非常有用的，因为绝大部分被控过程都是连续的，而实际运行的所有数字控制系统亦都是以模拟设计为基础。因此，本书的一个辅助目的就是帮助有经验的控制工程师转变为数字控制的专家。

在过去的几年中，出版了不少的有关信号数字处理和数字滤波的好书。必须指出应当区分信号的数字处理与数字控制二者之间的某些差别：信号的处理不都是实时，允许带有滞后。信号处理可以采用包括浮点 运算和数字舍入等算法。相反，在微机控制器（注，作者把应用微处理机的控制器称为微控制器，micro contraller 本书中全译为微机控制器）中只用定点和补码运算。另外在数字控制器的实际设计过程中，设计者的精力主要集中在有限字长，采样频率的选择，巧妙的算法编程，变量和参数适宜的放大系数以及数模和模数转换器的选择等等。这些关键问题本书中都将一一加以讨论并辅之以适当的例子。

根轨迹、伯德图这些成熟的图解设计方法仍然是有用的。由于大多数计算机系统中都有计算和显示这些特性曲线的程序。现在用不着再去死记作图的每一个细节了。而掌握快速作图技

巧的好处主要是在于使设计者能获得控制系统的原始设计方程。正是因为根轨迹和伯德图在数字控制的 w 平面法中非常有用。所以书中介绍了根轨迹和伯德图近似作图的基本规则。

这本书是以我个人和我的同事们在设计应用微处理机的数字控制系统方面的经验为基础编写的，其内容的选取和按排是作为我任教的 Technion-Israel 工学院数字控制课程一个学期的教材。

本书是用作大学最后一年及实习工程师的教材，故书中对定理的推导和证明尽量从简，而选用的微机控制器例子大多是实际运行的系统。本书的第一章主要介绍非时变的线性离散系统理论。重点讨论离散化的连续系统基本概念。第二章讨论以模拟控制器设计为基础的数字控制设计方法，对离散化引起的各种现象——例如由于采样产生的混淆——作了解释。并对各种离散化的方法作了对比。第三章讨论在离散域中进行的不以原先的模拟控制器设计为基础的数字控制器的设计方法。这里并不是说这些设计方法不需要以前的模拟控制器设计经验。第四章讨论以状态变量表示法为基础的多输入/多输出离散控制系统。这一章的一个内容是简要地介绍极点配置，观测器的设计和线性优化控制。本章有关的定理及其证明参见附录 A。第五章是数字控制器在微型计算机上编程，介绍了编程的各种方法并综述了微处理机和微型计算机的开发系统的概况。第六章对设计者来说是最重要的一章。因实际工作者最关心的是算法的具体执行以及由于数字化所产生的各种误差。不正确的编程往往会毁坏精心设计的数字控制器的性能指标。在第六章内将讨论各种误差以及伴随的数字现象。依据理论分析和实践经验提出的各种正确的编程建议是本章的中心论题。第七章中讨论的问题与第六章相关，采样频率的选择。提高采样频率就要求增

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

加字长。从经济效益出发，设计工作者的目标就是减小采样频率和字长，本章中还介绍两个与采样频率有关的新概念，响应保真度和粗糙度函数。第八章和第九章是具体的设计示例。这些示例都是实际运行的系统。用来具体地阐明前面各章的理论。附录 A 和 B 是第四章和第七章中引用的定理推导和证明。

书中习题的推荐答案可以从出版社出版的教师用版本中找到。

在此，我要向我的同事和学生表示感谢，他们贡献了宝贵的知识和经验。许多东西我是从他们那里学来的。特别是 Ytzhak Shenberg，他在微机控制器方面开拓性的工作，Bamck Glik，Nahum Nechemia 和 Yakor Sharoni，他们设计了第四，第五和第七章中各个微机控制器例子，还有经验丰富的工程师 Fred Berkowitz 和 Avher Ben-Zuci 提供了第八和第九二章的素材。作者还要感谢 R. J. Simpson 博士对手稿仔细校阅和提出许多有价值的建议。感谢责任编辑 Henry Hirschbery 帮助和指导及出版经理 Ron Decent（他俩都是 PHI 出版社的），他为了在很短时间内，把手稿变成这本书，克服了我们这些人相隔很远的困难，作出了非凡的努力。

最后，我要感谢在 RAFAEL-Israel MOD，工作的数千科学家所建立的难以置信的创造性工作气氛和给我的精神鼓舞及提供的各种服务。

保罗·凯茨

目　录

第一章 基 础 知 识

1.1 引 言

本书所讨论的自动控制问题一般可以用非时变的线性离散系统来描述．书中选用的实际例子可能包含非线性元件，譬如阈值或限幅器，但是从整个系统的特性来看，基本上可以认为是线性的，随时间缓慢变化的。

采样的线性连续控制系统的分析处理技术是在 50 年代发展起来的。这在一些经典著作中（RA-1，JU-1）都有介绍。就在采样理论发展的同时，由于数字计算机的推广应用，出现了一个研究数字分析的热潮，特别是数字积分，数值内插、外推和滤波；n 维状态空间系统的矩阵运算和 n 维连续系统离散模型的矩阵运算。在过去 200 年里由数学家所发展起来的数字分析和线性代数的各种理论和方法，在 50 和 60 年代，控制工程师和计算机研究工作者又重新进行了开发。

为了对典型的单输入单输出采样理论与多变量数字控制有所区别。本书通篇采用“离散化”来代替采样。

离散控制或数字控制包括纯离散系统在内，其数学理论相似于采样理论，此外多变量系统采用线性状态空间方法处理比较方便。

由于上述原因，本章分成下列三个部分：

(i) 用线性差分方程来描述线性离散系统。

(ii) 线性离散系统的 z 变换。

(iii) 线性连续系统的离散化（采样），离散化系统的性质和

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

s 平面与 z 平面之间的关系。

为了便于教学，在本章末有一个采样理论的简要综述作为附录 1A。

1.2 线性非时变离散系统

假定读者是熟悉线性系统基础理论的。

我们所讨论的动态离散系统可以用下面几种方法模拟或描述：

(i) 离散（或差分）方程；

(ii) 脉冲响应；

(iii) 传递函数。

1.2.1 系统

系统 S，它把输入 u 转变为输出 x，可以用图 1.1 中方块图来表示。

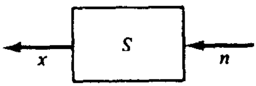

图 1.1 离散系统

当输入 u 为一串数字，$u=\{u_0, u_1\cdots u_i\}$，则输出亦为一串数字，$x=\{x_0, x_1\cdots x_i\}$。对于一个多维系统，则 u 和 x 皆为向量。

输入与输出之间的关系一般可表示为

$$x = S(u) \tag{1.1}$$

这里，S 就是定义系统的变换。

我们首先引入线性，非时变和脉冲响应等概念，把传递函数放在 z 变换一节中介绍。

1.2.2 线性

倘若系统变换 S 是服从叠加原理的。这个变换是线性的，

即，

$$x = S(au + bu') = aS(u) + bS(u') \qquad (1.2)$$

这种情况下，x 是 u 的一个线性函数，换言之，S 是一个线性算子。

1.2.3 非时变

假如系统 S 的响应与输入信号作用的时刻无关，则这个系统就是非时变的。

设 i 和 k 为无因次的时刻，那末

$$S(u_{i-k}) = x_{i-k} \qquad k \geqslant 0 \quad (1.3)$$

当 $i=0$，1，2，$\cdots k-1$ 时

$$u_{i-k} = 0$$

1.2.4 脉冲响应

令 h_i 为系统 S 对应于在 $i=0$ 时刻加入脉冲的响应。用输入-输出符号来描述就是。

假若　$u_0=\{1, 0, 0, \cdots 0\}$

那么　$x=S(u_0)=\{h_0, h_1, \cdots, h_i\}$ (1.4)

脉冲响应 h_i 是系统的一个特性，它可以用理论公式或实验方法来求得。

输入-输出关系是基于线性叠加原理。

系统的输出是各个脉冲作用之和。

$$x_i = \sum_{k=0}^{i} h_k u_{k-i} \quad u = \{u_0, u_1, \cdots, u_i\} \qquad (1.5)$$

x 是 u 的线性褶积。

例题：

$$h_i=(0.1)^i$$

$$u_i=1, 1, \cdots 1,$$

$$x_i=\sum_{k=0}^{i}(0.1)^k=\frac{1-(0.1)^{i+1}}{1-0.1}$$

1.2.5 离散时间系统

符号　t —— 时间；

i —— 整数（0，1，2…）；

T —— 采样周期；

f_s—— 采样率；

ω_s—— 采样频率。

上述各个变量之间互相关系如下

$$\left.\begin{aligned} i &= \frac{t}{T} \\ \omega_s &= \frac{2\pi}{T}(\mathrm{rad/s}) \\ f_s &= \frac{1}{T}(\mathrm{Hz}) \end{aligned}\right\} \tag{1.6}$$

下面通过例子来定义离散时间函数（参见图 1.2）

$f(i)$——离散时间函数　　$f(t)$——时间函数

$i=0,1,2,\cdots$　　t——连续变量

$f(i)=0.5i^2+2i$　　$f(t)=\frac{0.5}{T^2}t^2+\frac{2}{T}t$

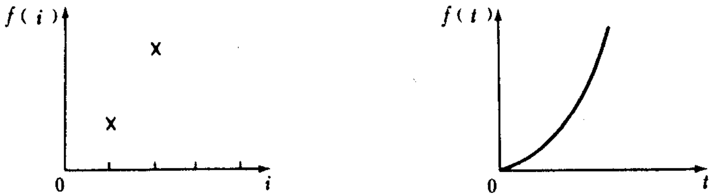

图 1.2 $f(i)$——离散时间函数

$f(t)$——连续时间函数

$f(i)$ 可以用 分析式表达，例如 $f(i)=0.5i^2+2i$

$f(i)$ 可以用 图表表达 例如

i	0	1	2	3	4
$f(i)$	0	2.5	6	10.5	16

$f(i)$ 可以通过对一个连续函数采样得到，或者从描述一个纯离散现象来获得，例如每年发生的事故次数。

本书中，$f(i)$一般是从一个连续函数 $f(t)$采样求得的，即，$f(iT)=f(t)$。后面叙述中我们采用简化的符号，$f(iT)\triangleq f_i$。其它书中用别的符号来表示 i，有的用 n 或 k，本书中，n 是用来表示 n 维系统的阶。

1.3 有限差分运算

有限差分运算是描述，分析和综合离散系统的一个有力工具。其作用类似于描述连续动态系统的线性微分方程，在文献中，差分运算的分类法结构也相似于微分方程。

这里，我们再次假定读者是熟悉微分方程以及微分方程在 s 平面上表示的方法。为了顺利地过渡。我们会时常把离散域与连续域相比较。

1.3.1 离散方程

如同微分方程一样，离散方程也是描述独立变量 i 和因变量 x 之间的关系，系统受作用函数 u_i 和/或初始条件 x_o，x_1，… 作用。

离散方程可以用（1.7）式来定义：

$$b_o x_{i+n} + b_1 x_{i+n-1} + \cdots b_{n-1} x_{i+1} + b_n x_i = u_i \tag{1.7}$$

式中 n 是方程（系统）的阶。

一阶齐次离散方程形式为：

$$b_o x_{i+1} + b_1 x_i = 0 \tag{1.8}$$

例题：x_i 为第 i 次统计的细菌数目

B 为细菌的繁殖率，A 为细菌的死亡率。

下一次统计的细菌数目为 $x_{i+1}=(B-A)x_i$

一阶离散方程为

$$x_{i+1}+(A-B)x_i=0$$

式中 x_0 是初始条件。

二阶离散方程的形式为

$$b_0x_{i+2}+b_1x_{i+1}+b_2x_i=u_i \tag{1.9}$$

另一个例子是求一座浮桥的总弯曲。

这里，一条 m 节浮桥中第 $i+1$ 节的弯曲 x_{i+1} 取决于负载 u_{i+1}，弹性系数 k 和相邻二节的弯曲（参见图 1.3）。A 正比于弯曲强度。

$$x_{i+1}={}^{1}/_{k}u_{i+1}+Ax_i+Ax_{i+2}$$

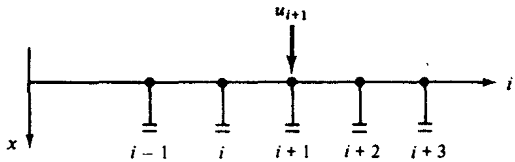

图 1.3　二阶离散系统的一个例子，一座浮桥的弯曲

注：这是本书中一个特殊例子，其独立变量不是时间。

一个 n 阶离散方程，或一个离散方程组可利用 n 阶方程来表示

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}_{i+1}=\begin{bmatrix} b_{11}\cdots & & \\ \vdots & & \\ & & bnn \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix}^{u_i} \tag{1.10}$$

这一 n 阶状态空间系统可以简化成一个一阶离散矩阵

$$\bar{x}_{i+1} = B\bar{x}_i + Gu_i \tag{1.11}$$

举例来说，考虑一个 $\alpha-\beta$ 雷达跟踪系统

$$\left.\begin{aligned} \tilde{y}_i &= y_{i-1} + T_{i-1}\nu_{i-1} \\ y_i &= \tilde{y}_i + 2\ (u_i - \tilde{y}_i) \\ \nu_i &= \nu_{i-1} + \frac{\beta}{T}\ (u_i - \tilde{y}_i \end{aligned}\right\}\ \text{一阶差分方程组}$$

式中：y ——在 i 次测量的远程；

$\tilde{y}_i$ ——在 $i-1$ 次测量的预估值；

ν_i ——在 $i-1$ 次测量时速度的估算值；

u_i ——对远程失真的影响。

用状态变量来表达

$$\begin{bmatrix} \tilde{y} \\ y \\ v \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & T \\ 1-\alpha & 0 & 0 \\ -\dfrac{\beta}{T} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{y} \\ y \\ v \end{bmatrix}_{i-1} + \left.\begin{bmatrix} 0 \\ \alpha \\ \dfrac{\beta}{T} \end{bmatrix}\right\}^{u_i}$$

1.3.2 差分方程

描述离散系统的另一个途径是通过分析因变量二个连续值的差的性质求得差分方程。用一阶前向差分 $\Delta x_i \triangleq x_{i+1} - x_i$ 把离散方程变换成差分方程：

$$a_0\Delta^n x_i + a_1\Delta^{n-1}x_i + \cdots a_{n-1}\Delta x_i + a_n x_i = u_i \tag{1.12}$$

高阶差分的定义与一阶差分相似，即，

$$\Delta^n x_i \triangleq \Delta(\Delta^{n-1}x_i) \tag{1.13}$$

按上面定义，二阶差分可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta^2 x_i &\triangleq \Delta(\Delta x_i) \\ &= \Delta x_{i+1} - \Delta x_i \\ &= x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i \end{aligned} \tag{1.14}$$

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com